中国生态农业学报 2016 年 7 月 第 24 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2016, 24(7): 845−852

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150937

施氮对单作和套作小麦产量和氮素利用特征的影响*

赵亚妮 王 科 王佳锐 陈远学** 杨 昱

(四川农业大学资源学院 成都 611130)

摘 要 小麦/玉米套作是四川主要的旱作模式，研究小麦的氮素吸收利用效率及套作玉米对小麦的影响有助于进一步提示套作小麦的增产优势、养分高效利用及了解玉米小麦间相互作用机理。本研究通过田间试验研究了不同氮水平下[0 kg(N)·hm^{-2}、60 kg(N)·hm^{-2}、120 kg(N)·hm^{-2}和 180 kg(N)·hm^{-2}，分别记为 N1、N2、N3 和 N4]小麦单作、小麦/空带和小麦/玉米套作 3 种模式中小麦的产量、氮素吸收利用特征和玉米对小麦的影响。结果表明：在不同的氮处理下，与单作小麦相比，小麦玉米套作的小麦始终表现出明显的产量优势，其生物量和籽粒产量比单作小麦平均增加 15.7%和 17.8%；套作小麦边行优势明显，其边行的地上部生物量、产量、吸氮量和氮肥偏生产力比单作行分别增加 23.8%、27.3%、48.9%和 19.1%，说明套作小麦比单作小麦对氮利用效率更高。不施氮(N1)和低氮(N2)处理小麦/玉米套作模式中小麦的生物量、产量比小麦/空带模式平均低 6.5%和 5.7%，但在中氮水平(N3)时小麦/玉米套作模式中小麦产量、地上部生物量、地上部吸氮量和氮肥偏生产力分别比小麦/空带模式高 14.1%、5.0%、6.8%和 4.5%。说明在小麦/玉米套作模式中套入玉米在施氮不足时小麦生长受到抑制，而在施氮充足时小麦生长得到促进。因此，套作小麦有边行优势和产量优势，小麦行间套作玉米时需要配施一定量的氮肥以消除小麦、玉米间的氮素竞争从而促进小麦的生长。

关键词 小麦/玉米套作 氮素管理 产量优势 边行优势 吸氮量 氮肥偏生产力
中图分类号: S344 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)07-0845-08

Wheat grain yield and nitrogen use characteristics under monoculture and intercropping with different nitrogen fertilization rates*

ZHAO Yani, WANG Ke, WANG Jiarui, CHEN Yuanxue**, YANG Yu

(College of Resources Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract Wheat/maize relay-intercropping system is an important rainfed planting pattern in Sichuan Province, China. It is therefore important to investigate rational nitrogen management strategies to improve not only productivity and nutrient use efficiency, but also to explore the yield advantage mechanism of the interaction between intercropped wheat and maize. In this direction, a field experiment was conducted in 2014 involving four nitrogen application rates (0 kg·hm^{-2}, 60 kg·hm^{-2}, 120 kg·hm^{-2} and 180 kg·hm^{-2}, denoted by N1, N2, N3 and N4, respectively) under three planting patterns. The planting patterns included wheat monoculture (W), wheat/maize strip relay-intercropping (W/M) and wheat/empty strip (W/E) at an experimental research base in Chongzhou, Sichuan. Grain yield, biomass, nitrogen uptake, nitrogen use efficiency and partial factor productivity of nitrogen (PFP-N) of wheat were calculated. The results showed that 1) intercropped wheat had yield advantage over monoculture wheat under all the nitrogen application rates. The aboveground biomass and grain yield of intercropped wheat in W/M and W/E treatments were on average 15.7% and 17.8% higher than that of monoculture wheat. 2) Border row wheat had advantage in terms of productivity, nitrogen uptake and nutrient use efficiency. Aboveground biomass, yield,

* 国家现代农业玉米产业技术体系项目(CARS-02-04)和国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(31210103906)资助
** 通讯作者：陈远学，主要从事植物营养与养分管理研究。E-mail: cyxue2002@aliyun.com
赵亚妮，主要从事作物高产高效研究。E-mail: 842680183@qq.com
收稿日期: 2015−08−26 接受日期: 2016−03−06

* The study was supported by the Program of Modern Agriculture Maize Industry of China (CARS-02-04) and the National Natural Science Foundation of China (31210103906).
** Corresponding author, E-mail: cyxue2002@aliyun.com
Received Aug. 26, 2015; accepted Mar. 6, 2016

nitrogen uptake and PFP-N of the border row wheat were 23.8%, 27.3%, 48.9% and 19.1% higher than those of monoculture wheat, respectively. It suggested that intercropped wheat had higher nitrogen use efficiency with higher grain yield compared to monoculture wheat. 3) Compared to W/E pattern, aboveground biomass and grain yield of wheat under W/M pattern dropped by 6.5% and 5.7% under the zero and 60 kg·hm^{-2} nitrogen application treatments, respectively. However, under the medium nitrogen application rate (N3, 120 kg·hm^{-2}) grain yield, aboveground biomass, shoot nitrogen uptake and PFP-N of wheat under W/M were 14.1%, 5.0%, 6.8% and 4.5% higher than those under W/E, respectively. These results indicated that intercropped wheat may be inhibited by intercropping maize under low nitrogen application rate (such as low than 60 kg·hm^{-2}), in contrast wheat development in intercropping could be promoted by sufficient nitrogen application. Furthermore, intercropped wheat had advantages in grain yield and nutrient use efficiency, especially for border row plants. Although maize and wheat interaction enhanced this process, sufficient nitrogen fertilizer application in maize and wheat was critical for promoting growth of relay-intercropped wheat.

Keywords Wheat/maize relay-intercropping; Nitrogen management; Yield advantage; Border row advantage; Nitrogen uptake; Partial factor productivity of nitrogen

氮是植物生长的必需营养元素之一，在保障粮食增产稳产方面起着不可替代的作用。但是氮素流动性大，不易被土壤吸附，易随水流失和转化损失，加之生产中不合理施用等因素，我国的氮肥利用率仅为 30%左右[1]，这对农业可持续发展产生了不利影响[2−3]。因此合理施氮、提高氮肥利用率已成为关系到国家粮食安全和环境质量安全的重大科技问题[4−5]。作物间套作基于不同作物在空间分布和养分需求等方面的差异，能有效利用光、温、水、肥等各种生长因子，从而获得高产、高效[6−8]，它既是传统农业的精华，在资源高效利用、环境友好和可持续发展的现代农业中仍起着重要的作用。与传统单作相比，间套作有明显的产量优势[9−10]。研究发现，边行优势是间作小麦获得产量优势的原因之一[11]，且小麦边行优势受地下部的作用大于地上部[12−13]。四川小麦大部分是套作小麦，小麦/玉米套作是川渝地区最主要的旱作体系。针对小麦/玉米套作体系中氮素转移及吸收利用[14]，不同施磷水平对玉米叶面积指数、干物质积累动态和磷肥利用效率的影响[15]，及小麦/玉米/大豆周年套作体系中氮素的积累分配和转运[16]的研究表明，小麦/玉米/大豆、小麦/玉米/红薯体系中根系不分隔较根系分隔小麦 ^{15}N 总吸收量和 ^{15}N 作物回收率提高，两体系中均存在氮素种间竞争促进作用和氮素转移，小麦/玉米/大豆较小麦/玉米/红薯更有利于肥料氮的吸收[14]；小麦/玉米/大豆间套作体系中适量施用磷肥可促进玉米的生长、减轻小麦对玉米的影响，同时可提高玉米当季磷肥利用率[15]；小麦各部位氮积累量都随氮用量增加而增大，小麦花后从营养器官向籽粒转移的氮量及其贡献率随施氮量增加而增大，但转移率在不同氮处理下差异不显著，随氮用量增加，籽粒的氮分配比例逐渐减少，而非籽粒部分的氮分配比例则逐渐增大，低氮处理显著影响套作小麦、玉米、大豆的产量及氮素的吸收积累，高氮投入会促使氮素滞留在营养器官中，阻碍其花后向籽粒中转移[16]。研究得出小麦/玉米/大豆体系全年施 N 量在 255~382.5 kg·hm^{-2}为宜，其中小麦 120~180 kg·hm^{-2}，玉米 195~292.5 kg·hm^{-2}，大豆不施或依苗情适当追施氮肥即可[16]。然而有关套作小麦的增产机理及氮素调控管理的研究仍缺乏，尤其关于“套作玉米对小麦有无影响，有多大影响？这种影响在不同营养条件下的响应如何？”的问题值得探究。为此，本研究通过田间试验，研究了不同施氮水平下小麦单作、小麦/玉米套作、小麦/空带套作 3 种模式中小麦的产量、氮素吸收利用特征，旨在为更好地利用小麦套作优势，提高氮素利用效率，实现高产高效提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2013 年 10 月 30 日—2014 年 5 月 6 日在四川农业大学崇州现代农业试验示范基地(103.6′E, 30.6′N)进行。崇州属四川盆地亚热带湿润季风气候，四季分明，雨量充沛，日照偏少，无霜期较长。年平均气温 15.9 ℃，最热月 7 月平均气温为 25 ℃，最冷月 1 月平均气温 5.4 ℃，温差为 19.7 ℃。年平均日照时数为 1 161.5 h，年平均降雨量 1 012.4 mm，雨日和雨量均为夏多冬少，春季为 176.1 mm，夏季为 588.0 mm，秋季为 218.4 mm，冬季为 29.9 mm。试验地土壤类型为水稻土，土壤质地为壤土，耕种前耕层(0~20 cm)混合土样 pH 6.3、有机质 37.6 g·kg^{-1}、全氮 2.03 g·kg^{-1}、碱解氮 136 mg·kg^{-1}、有效磷 20.4 mg·kg^{-1}、速效钾 101 mg·kg^{-1}。

1.2 试验材料

供试小麦为高抗优质品种‘蜀麦969’，由四川农

业大学小麦研究所选育；玉米选用四川省和农业部主推优良品种‘川单418’，由四川农业大学玉米研究所选育。供试化肥为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P_2O_5 12%)和氯化钾(含K_2O 60%)，均购于当地农资门市部。

1.3　试验设计

试验采用二因素裂区试验设计，主处理为施氮水平，小麦的 4 个施氮(N)水平分别为：0 kg·hm^{-2} (N1)、60 kg·hm^{-2}(N2)、120 kg·hm^{-2}(N3)和 180 kg·hm^{-2} (N4)；玉米的 4 个施氮(N)水平分别为：0 kg·hm^{-2} (MN1)、90 kg·hm^{-2}(MN2)、180 kg·hm^{-2}(MN3)和 270 kg·hm^{-2}(MN4)。同处理的磷钾都一致适量施用。裂区处理为 3 种种植模式，分别为小麦单作(W)、小麦/玉米套作(W/M)以及小麦/空带套作(W/E)，田间随机排列，每处理重复 3 次。W/M 和 W/E 中的小麦种植规格相同。

小区面积 5 m×6 m=30 m^2，小区幅宽 6 m。小麦于 2013 年 10 月 30 日条播，用种量 180 kg·hm^{-2}。小麦行距 20 cm，单作小区种植 30 行(图 1A)。套作小区中，小麦、玉米带幅均为 1 m，每个小麦带幅种 5 行小麦，小麦带幅间隔 1 m 作为套作玉米的预留行(隙地)，即套作小区中小麦、玉米采用 1 m/1 m 的田间配置，小区内共有 3 个小麦带幅。小麦齐穗扬花期(2014 年 3 月 25 日)时在预留的隙地中栽种 2 行玉米，玉米实行肥团育苗，两叶一心期(2014 年 4 月 8 日)移栽，行距 50 cm，穴距 38 cm，穴植 2 株，种植密度为 52 500 株·hm^{-2}(图 1B)。小麦/空带模式中预留隙地中不栽玉米(图 1C)。小麦播种时开深 5 cm 左右的沟，60%的氮和全部磷、钾肥撒于沟内，然后播种盖土；另于分蘖期追施 40%的氮，用改装的喷雾器喷淋，而后浇水以利于氮肥进入土壤被植物吸收。玉米移栽时 30%的氮和全部磷、钾肥撒于穴内，覆土后栽植玉米苗；另于拔节期、抽雄期分别追施 30%、40%的氮，兑清水冲施于株旁。小麦于 2014 年 5 月 6 日收获测产。

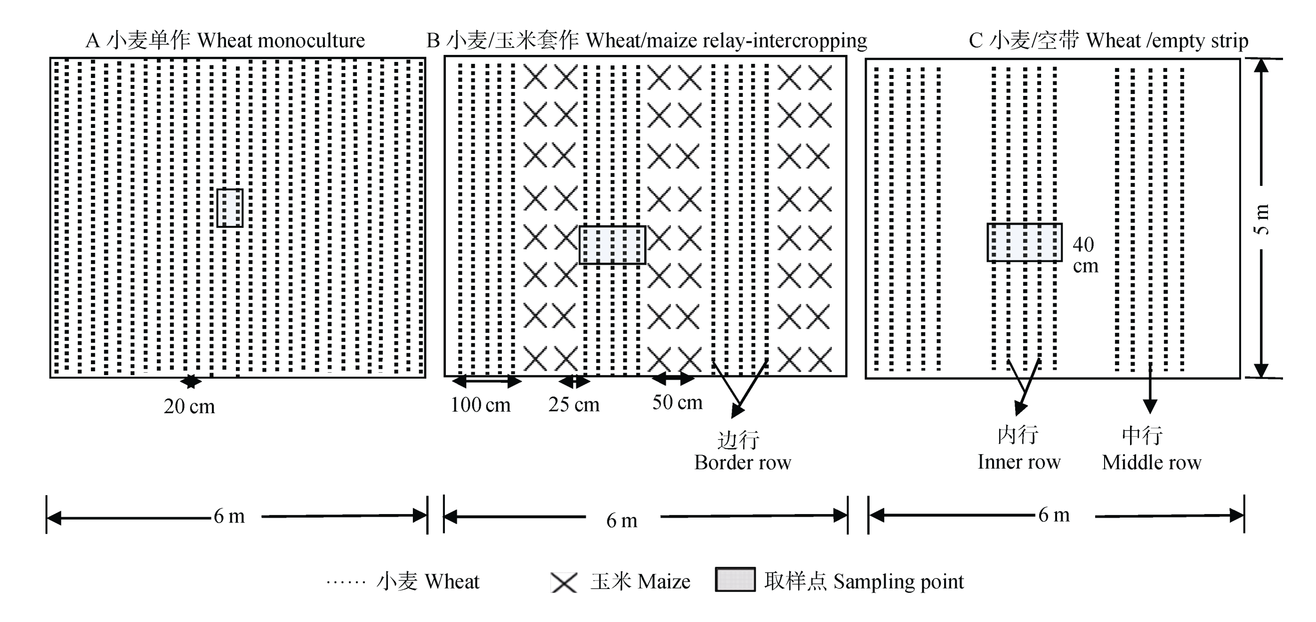


图 1　不同种植模式的田间布局和取样点位置图

Fig. 1　Field layouts and sampling points locations of different planting patterns

1.4　测定项目及方法

1.4.1　干物质积累量和养分含量

于收获期在采样区选取长势一致具有代表性的小麦，采集40 cm长样段的植株，单作小麦采中间的2行(图1A)，套作小麦(小麦/玉米和小麦/空带)采种植带上的各行，然后两边行合并、两内行合并，以及中间一行，分别制成边行、内行和中间行样品(图1B，C)。采后按地上部秸秆(包括茎秆、叶片和颖壳)和籽粒分开烘干称重，计算干物质重，样品粉碎过60目筛，用凯式半微量蒸馏定氮法测定氮含量[17]。

1.4.2　产量

单作小麦在测产区选取中间的4行进行收割，套作小麦(小麦/玉米和小麦/空带)收获中间的1个种植带(5行)，分边行、内行和中行分开收割，然后脱粒机脱粒，晒干，计实收籽粒产量。

1.4.3　各指标的计算

植株地上部吸氮量(kg·hm^{-2})=Σ收获期地上部各器官生物量(kg·hm^{-2})×各器官含氮量(g·kg^{-1})　　(1)

氮素收获指数(%)=籽粒吸氮量/植株地上部吸氮量×100%　　(2)

氮素生理利用效率(kg·kg^{-1})=(施氮区籽粒产量–

不施氮区籽粒产量)/(施氮区植株地上部吸氮量–不施氮区植株地上部吸氮量) (3)

氮素农学利用效率($kg·kg^{-1}$)=(施氮区籽粒产量–不施氮区籽粒产量)/施氮量 (4)

氮肥偏生产力($kg·kg^{-1}$)=籽粒产量/施氮量 (5)

1.5 数据处理

本研究中，为便于比较，单作、套作小麦的生物量和产量等指标，是以种植带的实占面积来计算的。所有数据采用Microsoft Excel 2010软件进行计算处理，利用SPSS 13.0软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量处理下单套作小麦生物量的变化

从表1可以看出，不同施氮量和种植模式对小麦生物量有极显著影响($P<0.01$)，但施氮水平和种植模式无显著的交互效应($P>0.05$)。随着施氮量的增加，单、套作小麦地上部生物量均呈先增大后减小的趋势，均在N3处理时达最大，当氮用量超过120 $kg·hm^{-2}$时，其生物量不再增加。在不同氮处理下，套作小麦地上部干物质积累量均高于单作小麦，N1~N4处理套作比单作分别增加11.9%、17.7%、19.8%和13.6%。套作小麦不同行的生物量有明显的规律性，即边行>内行>中间行，中间行的生物量与单作行基本持平，边行比内行、中间行分别高9.6%和22.0%，边行比单作行大18.4%~34.6%。由此可看出，套作小麦的生物量优势主要来源于边行。小麦/玉米和小麦/空带相比，小麦生物量在不同氮处理条件下表现不同，N1、N2和N4时小麦/玉米比小麦/空带分别减少7.6%、5.3%和12.2%，而在N3处理时小麦/玉米比小麦/空带增加5.0%。

表1 不同施氮量下单作和与玉米套作小麦不同种植行的地上部生物量

Table 1 Aboveground shoot biomasses of monocultured (W) and relay-intercropped (W/M, W/E) wheat in different rows under different nitrogen application levels $kg·hm^{-2}$

施氮量 N application level	W	W/M			W/E		
		边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row	边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row
N1	11 296±200d	13 369±834abc	12 419±603bcd	11 620±587cd	14 536±776a	13 268±344abcd	12 776±445abcd
N2	12 979±203d	15 503±1 040abcd	14 692±430abcd	13 504±362cd	16 828±887a	15 209±1 003abcd	14 204±1 122bcd
N3	14 569±554f	19 143±452a	16 833±1 159bcdef	14 954±757def	17 832±452ab	15 264±629cdef	14 709±295ef
N4	13 839±638e	17 008±299abc	15 268±505cde	14 032±566de	18 120±1 094a	14 364±1 197ab	16 080±704bc
AVON	施氮水平 Nitrogen application level				Sig.=0.000		
	种植模式 Planting pattern				Sig.=0.000		
	施氮水平×种植模式 Nitrogen application level × planting pattern				Sig.=0.879		

表中数据为3次重复的平均值±标准误；不同小写字母表示同氮处理下不同种植方式和行间差异达5%显著水平；N1、N2、N3、N4分别为小麦施N量为0 $kg·hm^{-2}$、60 $kg·hm^{-2}$、120 $kg·hm^{-2}$和180 $kg·hm^{-2}$；W代表单作小麦，W/M代表小麦/玉米套作，W/E代表小麦/空带。下同。
The data in table is the average ± SE of three repetitions. Different lowercases under the same N application rate indicate significant difference among different planting patterns and different rows at 5% level. N1, N2, N3 and N4 mean the N application levels of 0 $kg·hm^{-2}$, 60 $kg·hm^{-2}$, 120 $kg·hm^{-2}$ and 180 $kg·hm^{-2}$, respectively. W indicates wheat monoculture, W/M indicates wheat/maize relay intercropping, W/E indicates wheat/empty strip. The same below.

2.2 不同施氮量处理下单套作小麦籽粒产量的变化

如表2所示，不同施氮和种植模式对小麦籽粒产量有极显著影响($P<0.01$)，但施氮水平和种植模式无显著的交互效应($P>0.05$)。小麦籽粒的变化趋势与其生物量变化趋势基本一致，即随着施氮量增加单套作小麦的籽粒产量呈先增加后减小的趋势，均在N3时最大，当氮用量超过120 $kg·hm^{-2}$时，单作、套作小麦的籽粒产量不再增加；而小麦/空带处理的小麦籽粒产量有随施氮量增加而增大的趋势，在N4时最大。在不同的氮处理下，与相应单作相比，套作小麦具有明显的产量优势，N1~N4处理套作比单作分别增加14.06%、20.66%、21.29%和15.24%。套作小麦不同行的籽粒产量是边行>内行>中间行，中间行的籽粒产量与单作行基本持平，边行籽粒产量比内行、中间行分别高12.38%、18.80%，边行比单作行增加20.03%~35.00%。表明套作小麦有明显的产量优势，其产量优势主要来源于边行优势。小麦/玉米和小麦/空带相比，小麦籽粒产量在不同氮处理条件下表现不同，N1、N2和N4时是小麦/玉米比小麦/空带分别减少8.33%、3.13%和4.51%，而在N3处理时是小麦/玉米比小麦/空带增加14.13%。

由表3可知，单、套作小麦的收获指数均在N1时最大，随着施氮量的增加单、套作小麦的收获指数减小。在不同氮处理下，小麦/玉米处理中套作小麦收获指数比单作小麦分别高6.41%、5.47%、3.60%和1.22%。

表 2　不同施氮量下单作和套作小麦不同种植行的产量

Table 2　Grain yields of monocultured (W) and relay-intercropped (W/M, W/E) wheat in different rows under different nitrogen application levels　　kg·hm^{-2}

施氮量 N application level	W	W/M			W/E		
		边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row	边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row
N1	5 633±236d	6 762±387abc	6 216±296bcd	6 172±341cd	7 367±497a	6 868±417abc	6 575±260abcd
N2	6 257±242d	7 723±281abc	7 567±374abc	7 165±183bcd	8 418±244a	7 608±434abc	6 915±489cd
N3	6 929±299f	9 354±201a	7 976±396bcde	7 360±291def	8 747±499abc	7 767±409cdef	7 181±135ef
N4	6 357±328de	8 302±538ab	6 838±381cde	6 349±162e	9 026±371a	8 242±429ab	7 773±117bc
AVON	施氮水平 Nitrogen application level				Sig.=0.000		
	种植模式 Planting pattern				Sig.=0.000		
	施氮水平×种植模式 Nitrogen application level × planting pattern				Sig.=0.141		

表 3　不同施氮量下单作小麦和与玉米套作小麦不同种植行的收获指数

Table 3　Harvest indexes of monocultured (W) and relay-intercropped (W/M, W/E) wheat in different rows under different nitrogen application levels

施氮量 N application level	W	W/M			W/E		
		边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row	边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row
N1	0.49±0.007b	0.51±0.007ab	0.50±0.011ab	0.53±0.015a	0.51±0.008ab	0.52±0.027ab	0.51±0.003ab
N2	0.48±0.010d	0.49±0.010bcd	0.52±0.011abc	0.53±0.002a	0.50±0.011abcd	0.50±0.006abcd	0.49±0.016cd
N3	0.47±0.004a	0.49±0.004a	0.47±0.010a	0.49±0.003a	0.49±0.026a	0.51±0.014a	0.49±0.019a
N4	0.46±0.031a	0.49±0.031a	0.45±0.012a	0.45±0.010a	0.50±0.027a	0.48±0.016a	0.48±0.016a

2.3　不同施氮量下单套作小麦的氮素积累及氮效率变化

从表4可知，不同施氮量和种植模式对小麦氮素积累量有极显著影响(P<0.01)，但施氮水平和种植模式无显著的交互效应(P>0.05)。随着施氮量的增加单套作小麦的氮积累量先增加后减小，均在N3时最大，当氮用量超过120 kg·hm^{-2}时，单套作小麦氮积累量不再增加；而小麦/空带处理的小麦氮积累量有随施氮量增加而增大的趋势，在N4时最大。在不同的氮处理条件下，套作小麦氮积累量比单作分别增加22.04%、32.11%、37.55%和25.47%；套作小麦不同行的氮积累量也有边行>内行>中间行的变化趋势，中间行的氮积累量比单作行基本持平或略有增大，边行氮积累量比内行、中间行分别高20.66%和36.65%，边行氮积累量比单作行增加39.00%~63.61%。小麦/玉米和小麦/空带相比，在不同氮处理条件下，其氮积累量的表现规律不同，在N1、N2和N4处理时，小麦/玉米比小麦/空带分别减少15.66%、11.05%和16.14%，但在N3处理时，小麦/玉米比小麦/空带增加6.77%。

表 4　不同施氮量下单作小麦和与玉米套作小麦不同种植行的氮积累量

Table 4　Nitrogen accumulation of monocultured (W) and relay-intercropped (W/M, W/E) wheat in different rows under different nitrogen application levels　　kg·hm^{-2}

施氮量 N application level	W	W/M			W/E		
		边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row	边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row
N1	123±4.84e	171±8.43ab	139±7.81cde	130±9.18de	195±8.95a	176±6.82a	147±15.53bcde
N2	148±8.49e	237±22.16ab	199±9.14bcd	163±12.43de	245±22.17a	213±1.69abc	185±5.27cde
N3	196±8.43e	309±10.47a	255±26.66abcde	224±7.58cde	293±25.58abc	236±27.55bcde	212±4.08de
N4	192±7.24d	287±15.58a	220±15.70bcd	193±10.61cd	314±25.09a	268±20.52a	270±3.11a
AVON	施氮水平 Nitrogen application level				Sig.=0.000		
	种植模式 Planting pattern				Sig.=0.000		
	施氮水平×种植模式 Nitrogen application level × planting pattern				Sig.=0.144		

另从表5可看出，随着施氮量的增加单、套作小麦的氮素收获指数减小，均在N1时最大。与单作小麦相比，小麦/玉米处理中套作小麦的氮素收获指数在N1和N2时比单作分别高2.17%和5.56%，而在N3

表 5　不同施氮量下单作小麦和与玉米套作小麦不同种植行的氮素收获指数

Table 5　Nitrogen harvest indexes of monocultured (W) and relay-intercropped (W/M, W/E) wheat in different rows under different nitrogen applications

施氮量 N application level	W	W/M			W/E		
		边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row	边行 Border row	内行 Inner row	中间行 Middle row
N1	0.76±0.002a	0.78±0.019a	0.75±0.021a	0.78±0.026a	0.79±0.003a	0.81±0.017a	0.79±0.009a
N2	0.72±0.011b	0.73±0.019a	0.76±0.008a	0.76±0.011a	0.76±0.009a	0.77±0.022a	0.76±0.012a
N3	0.73±0.006a	0.73±0.008a	0.73±0.007a	0.76±0.008a	0.71±0.031a	0.74±0.050a	0.73±0.018a
N4	0.70±0.008bcd	0.73±0.023abc	0.68±0.008d	0.69±0.008cd	0.70±0.007abcd	0.70±0.032abcd	0.74±0.017a

和N4处理时小麦/玉米的氮素收获指数都低于单作。小麦/玉米和小麦/空带相比，在不同的氮处理条件下，小麦氮素收获指数的表现规律不同，在N1处理时，小麦/玉米比小麦/空带减少3.29%，而在N3处理时，小麦/玉米比小麦/空带增加2.33%。

小麦的氮素利用效率如表6所示。不同施氮量对小麦氮素生理效率和氮肥偏生产力有极显著影响(P<0.01)，对小麦氮素农学利用率无显著影响(P>0.05)；不同种植模式对小麦氮素生理效率和农学利用率都无显著影响(P>0.05)，对氮肥偏生产力有极显著影响(P<0.01)；施氮水平和种植模式间无显著的交互效应(P>0.05)。从N2~N4，随着施氮量的增加单、套作小麦的氮素生理利用率、农学效率和氮肥偏生产力均随之减小，说明增施氮肥会明显降低氮利用效率。除高氮N4处理外，在N2和N3条件下，氮素农学效率和氮肥偏生产力都是W/M>W/E>W。从总体上看，套作小麦的氮素生理利用率、农学效率和氮肥偏生产力都比单作小麦明显增高，氮素生理利用率W/M、W/E分别比W高9.09%和2.87%，氮素农学效率W/M、W/E分别比W高56.18%和19.10%，氮肥偏生产力W/M、W/E分别比W高19.91%和23.71%。W/M和 W/E相比，小麦的氮生理利用率、农学效率和氮肥偏生产力都无显著差异。说明套作小麦的氮利用效率显著高于单作小麦。

表 6　不同施氮量下小麦的氮素利用效率

Table 6　Nitrogen use efficiency of monocultured (W) and relay-intercropped (W/M, W/E) wheat under different nitrogen application levles

施氮量 N application level	氮素生理利用率 Physiological nitrogen use efficiency ($kg\cdot kg^{-1}$)			氮素农学利用率 Agronomic nitrogen use efficiency (%)			氮肥偏生产力 Partial factor productivity of nitrogen fertilizer ($kg\cdot kg^{-1}$)		
	W	W/M	W/E	W	W/M	W/E	W	W/M	W/E
N1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N2	34.2±1.58a	40.5±2.90a	37.1±3.49a	10.4±4.04a	18.7±4.49a	13.1±5.56a	104.3±4.04b	125.8±4.49a	129.9±5.56a
N3	15.8±3.93a	18.0±0.52a	13.0±0.86a	10.8±2.50a	16.5±2.35a	10.2±1.85a	57.7±2.50b	70.0±2.35a	67.0±1.85ab
N4	12.5±3.66a	12.8±2.21a	14.5±2.40a	5.4±1.72a	6.6±1.72a	8.5±0.02a	35.3±1.82b	40.7±1.72ab	47.4±0.02a
平均值 Mean	20.9±6.75	22.8±1.34	21.5±7.80	8.9±1.74	13.9±3.72	10.6±1.34	65.8±20.32	78.9±24.96	81.4±24.89
AVON									
施氮水平 Nitrogen application level			Sig.=0.000		Sig.=0.093				Sig.=0.000
种植模式 Planting pattern			Sig.=0.294		Sig.=0.460				Sig.=0.000
施氮水平×种植模式 Nitrogen application level × planting pattern			Sig.=0.053		Sig.=0.567				Sig.=0.069

表中数据为 3 次重复的平均值±标准误；不同小写字母表示同氮处理下不同种植方式间差异达 5%显著水平。The data in the table is the average ± SE of three repetitions. Different lowercases in the same N level mean significant difference among different planting patterns at 5% level.

3　讨论与结论

作物间套作既是传统农业的精华，也是现代农业高产高效的主要措施之一。已有相关多的研究证明，间套作有利于作物稳产和增产，提高资源利用效率，有明显的产量优势[18–20]。齐万海等[21]和樊高琼等[22]在四川小麦间套种植中也发现套作小麦相对单作小麦表现出产量优势和边行优势。在本研究中，套作小麦边行生物量和籽粒产量分别比单作行平均增加23.81%和27.27%，套作小麦的产量、生物量和收获指数比单作平均提高了17.81%、15.74%和4.18%。同时还发现，在不同的氮处理条件下，小麦/玉米体系中小麦地上部氮素积累量、籽粒氮积累量和氮肥偏生产力均显著高于单作小麦，分别平均提高了48.91%、32.63%和19.08%。正是由于套作小麦的边行相对内行、中间行有更高的生物量、氮吸收量和氮

利用效率，从而得到了产量和养分效率的优势。在四川小麦/玉米套作体系中，玉米是在小麦扬花期栽植入小麦行间的，小麦、玉米间只存在40多天的共生期，虽说此共生期不长，而且后套玉米是在小麦行间，小麦收获时玉米才长至拔节期(6~8叶期)，那么套入的玉米对小麦有多大的影响呢？本研究探究了不同施氮量下套作玉米对小麦的影响，从结果来看，既存在着小麦与玉米的种间竞争又存在着小麦的种内竞争作用，在小麦/空带体系中，只有小麦的种内竞争作用。以往的报道指出小麦与玉米间套作时，小麦对土壤和肥料氮的竞争力强于玉米，处于竞争优势，玉米为劣势作物[23–25]。本研究也证实了这点。在中氮(N3)时，小麦套作优势是小麦/玉米>小麦/空带，小麦/玉米中小麦的产量和地上部生物量分别比小麦/空带增加了14.13%和5.03%，地上部吸氮量、籽粒吸氮量和氮肥偏生产力分别平均增加了6.77%、7.50%和4.51%。这一方面是因为小麦/玉米间作后，其根系形态发生了变化，间作小麦的地下部鲜重、根体积和根数目增加，而间作玉米的根长减少[26–27]，使间作小麦吸收了更多的养分；另一方面可能是因为小麦/玉米间作后，其根系分布发生了变化。Li等[28]、刘广才等[29]的田间研究发现，与小麦间作的玉米在共生期根系水平生长范围受到抑制，小麦根系能够伸入扩展到玉米根区，而玉米的根系不能伸入到小麦根区，导致小麦收获时增产和养分吸收优势的获得。除此之外，在小麦、玉米共生期间，小麦、玉米的生育期不同，小麦从穗期至收获期，而玉米从移栽到拔节期，两作物对于养分需求的高峰期错开而表现出小麦从套入玉米中受宜[10]。但研究同时发现，小麦和玉米之间的种间作用关系在不同的施氮量下表现不同，即在不施氮(N1)和低氮(N2)时，小麦/空带体系中小麦的产量和地上部生物量平均比小麦/玉米套作增加6.16%(产量)和6.91%(生物量)，而在高氮(N4)时，小麦/玉米套作体系中小麦的产量和生物量比小麦/空带体系减少4.51%和12.24%。这可能是因为在不施氮和低氮时，小麦/玉米套作体系中小麦和玉米对养分的竞争激烈[30]，小麦的生长受到玉米的竞争，而小麦/空带模式中，小麦具有更大的发展空间，其边行能够吸收更多的土壤养分，促进了边行优势的形成，所以使其吸氮量、籽粒吸氮量和氮肥偏生产力均比小麦/玉米模式平均增加15.50%、16.65%和16.46%；而在中氮(N3)时，小麦/玉米套作体系中小麦的养分已经充足，不需要从玉米行得到养分，所以受玉米的影响不明显，如果再增施氮肥，其小麦的产量和生物量会有下降的趋势，所以过量施用氮肥也不利于小麦/玉米体系中小麦的生长。

综合来看，本研究中套作小麦相对于单作具有明显的产量优势、边行优势和更强的氮素吸收能力，能更好地利用氮肥。在小麦/玉米套作体系中，小麦和玉米间的种间作用关系因施氮量的不同而不同，在施氮不足的条件下，套入玉米对小麦有明显的竞争抑制作用，增加施氮用量至适宜水平后，小麦受套入玉米的竞争减弱，甚至由于玉米的施肥而对小麦有促进作用。所以建议在小麦/玉米套作体系中必须配施一定量的氮肥以消除小麦玉米之间对氮肥的竞争，从而促进小麦的生长。

参考文献 References

[1] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. The fertilizer utilization present situation and the way of improving of Chinese main food crop[J]. Journal of Soil, 2008, 45(5): 915–924

[2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010

[3] 孙占祥, 邹晓锦, 张鑫, 等. 施氮量对玉米产量和氮素利用效率及土壤硝态氮累积的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 119–123
Sun Z X, Zou X J, Zhang X, et al. Effects of N application rate on maize yield, nitrogen use efficiency and the accumulation of soil nitrate nitrogen[J]. Corn Science, 2011, 9(5): 119–123

[4] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer problems of guaranteeing food security in our country[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259–273

[5] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783–795
Ju X T, Gu B J. Nitrogen fertilization status, problems and trends in China farmland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(4): 783–795

[6] 焦念元, 宁堂原, 赵春, 等. 施氮量和玉米–花生间作模式对氮磷吸收与利用的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(4): 706–712
Jiao N Y, Ning T Y, Zhao C, et al. Effects of N application rate and corn-peanut intercropping system on the nitrogen and phosphorus uptake and utilization[J]. Crop Science, 2008, 34(4): 706–712

[7] Harris D, Natarajan M, Willey R W. Physiological basis for yield advantage in a sorghum/groundnut intercrop exposed to drought. 1. Dry-matter production, yield, and light interception[J]. Field Crops Research, 1987, 17(87): 259–272

[8] 郭智, 周炜, 陈留根, 等. 稻秸还田对稻麦两熟农田麦季养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 17–20
Guo Z, Zhou W, Chen L G, et al. Effect of rice straw return on surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during wheat growing season in intensive rice-wheat rotation field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 17–20

[9] 陈远学, 刘静, 陈新平, 等. 四川几种轮套作体系的产量及小麦玉米磷素利用效率研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1175–1182
Chen Y X, Liu J, Chen X P, et al. Studies on yields and

phosphorus use efficiency of wheat and maize with different rotation and relay-intercropping systems in Sichuan[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(5): 1175–1182
[10] 陈远学, 刘静, 陈新平, 等. 四川轮套作体系的干物质积累、产量及氮素利用效率研究[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 68–79
Chen Y X, Liu J, Chen X P, et al. Dry matter accumulation, yield and nitrogen use efficiency of crops rotation and intercropping systems in Sichuan[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(6): 68–79
[11] 叶优良, 孙建好, 李隆, 等. 小麦/玉米间作根系相互作用对氮素吸收和土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 33–37
Ye Y L, Sun J H, Li L, et al. Effect of wheat/maize intercropping root interaction on nitrogen uptake and soil nitrate nitrogen[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 33–37
[12] 陈雨海, 余松烈, 于振文. 小麦边际效应的研究[J]. 山东农业大学学报, 1999, 30(4): 431–435
Chen Y H, Yu S L, Yu Z W. Study on the edge effect in wheat[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 1999, 30(4): 431–435
[13] 齐万海, 柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 31–34
Qi W H, Chai Q. Yield response to wheat/maize competitiveness in wheat/maize intercropping system under different root partition patterns[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 31–34
[14] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 等. 两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3170–3178
Yong T W, Yang W Y, Ren W J, et al. Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3170–3178
[15] 陈远学, 李汉邯, 周涛, 等. 施磷对间套作玉米叶面积指数、干物质积累分配及磷肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2799–2806
Chen Y X, Li H H, Zhou T, et al. Effects of phosphorus fertilization on leaf area index, biomass accumulation and allocation, and phosphorus use efficiency of intercropped maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 2799–2806
[16] 陈晓辉, 徐开未, 唐义琴, 等. 麦/玉/豆周年套作体系氮素积累分配及转运[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 5(5): 1128–1139
Chen X H, Xu K W, Tang Y Q, et al. Nitrogen accumulation, allocation and translocation in wheat/maize/soybean relay intercropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 5(5): 1128–1139
[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1987: 191–203
Bao S D. Analysis Methods for Soil Agrochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1987: 191–203
[18] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(5): 965–973
Xiao Y B, Li L, Zhang F S, et al. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and faba bean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5): 965–973
[19] Li L, Sun J, Zhang F, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: Ⅰ. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Research, 2001, 71(2): 123–137
[20] 李少明, 赵平, 范茂攀, 等. 玉米大豆间作条件下氮素养分吸收利用研究[J]. 云南农业大学学报, 2004, 19(5): 572–574
Li S M, Zhao P, Fan M P, et al. Study of nitrogen uptake and utilization in maize and soybean intercropping system[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2004, 19(5): 572–574
[21] 齐万海, 柴强, 于爱忠. 间作小麦的边行效应及其与根系空间分布的关系[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(1): 72–76
Qi W H, Chai Q, Yu A Z. Relationship between edge effects and root spatial distribution of intercropping wheat[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(1): 72–76
[22] 樊高琼, 杨文钰, 任万军, 等. 不同带宽对套作小麦产量及边际效应的影响[J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(2): 133–136
Fan G Q, Yang W Y, Ren W J, et al. Effects of different bandwidth on the yield and border effect of relaying wheat[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2009, 27(2): 133–136
[23] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 豆科//禾本科间作系统中氮营养研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(6): 44–49
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The research progress of the nitrogen nutrition in the legume//gramineae system[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2003, 5(6): 44–49
[24] 雍太文, 向达兵, 张静, 等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作的氮素吸收利用及氮肥残效研究[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 34–44
Yong T W, Xiang D B, Zhang J, et al. Analysis of the nitrogen uptake and utilization efficiency and N fertilizer residual effect in the wheat-maize-soybean and wheat-maize-sweet potato relay strip intercropping[J]. Acta Prataculturea Sinica, 2011, 20(6): 34–44
[25] 陈远学, 陈晓辉, 唐义琴, 等. 不同氮用量下小麦/玉米/大豆周年体系的干物质积累和产量变化[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 73–83
Chen Y X, Chen X H, Tang Y Q, et al. Effect of nitrogen fertilizer on dry matter accumulation and yield in wheat/maize/soybean intercropping systems [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 73–83
[26] 夏海勇, 李隆, 张正. 间套作体系土壤磷素吸收优势和机理研究进展[J].中国土壤与肥料, 2015, 1(1): 1–6
Xia H Y, Li L, Zhang Z. Research advances on soil phosphorus acquisition advantages and mechanisms in intercropping systems[J]. Soil and Fertilizer, 2015, 1(1): 1–6
[27] 郝艳如, 劳秀荣, 孟庆强, 等. 玉米/小麦间作对根际土壤和养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2002, 18(4): 20–23
Hao Y R, Lao X R, Meng Q Q, et al. Effects of maize/wheat intercropping on the rhizosphere and nutrient absorption[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2002, 18(4): 20–23
[28] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. Oecologia, 2006, 147(2): 280–290
[29] 刘广才, 杨祁峰, 李隆, 等. 小麦/玉米间作优势及地上部与地下部因素的相对贡献[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 477–484
Liu G C, Yang Q F, Li L, et al. Intercropping advantage and contribution of above and below ground interactions in wheat-maize intercropping [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(2): 477–484
[30] Li Q Z, Sun J H, Wei X J, et al. Over yielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. Plant Soil, 2011, 339(1/2): 147–161